

УДК 612.396.674.1

ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА С ОБЛУЧАТЕЛЕМ В ВИДЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2019 г., после доработки – 22 декабря 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты разработки широкополосного облучателя двухзеркальной антенны Кассегрена с управляемой поляризацией поля излучения. Теоретически исследованы характеристики облучателя в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц. Определены геометрические параметры антенн Кассегрена и теоретически исследованы её характеристики.

Ключевые слова: двухзеркальная антенна, широкополосный облучатель, решётка печатных излучателей, управление поляризацией.

Abstract. The broadband feeder of two-mirror Cassegrain antenna in the form of patch radiators array is developed. Theoretical investigations of the patch array antenna characteristics in the frequency bands 10.7 — 12.7 GHz and 13.7 — 14.5 GHz are carried out. It is shown that the patch array forms a field with qualitative characteristics of radiation directivity and polarization structure. At the same time, in the operating frequency bands, the array antenna is characterized by broadband input matching. Taking into account the feeder characteristics, the geometric parameters of the large and small mirrors of Cassegrain antenna are selected. Theoretical investigations of the two-mirror antenna characteristics in the frequency bands 10.7 — 12.7 GHz and 13.7 — 14.5 GHz are presented. It is shown that the developed dual-mirror antenna is characterized by the high gain of 38 — 41 dBi, qualitative linear and circular polarizations, qualitative matching at the patch radiators inputs.

Key words: two-mirror antenna, wideband feeder, patch array antenna, polarization control.

1. Введение

На сегодняшний день активно развиваются различные радиотехнические системы, решающие задачи радиолокационного обзора пространства, удалённого сопровождения подвижных объектов, спутниковой связи. Для этих целей широко применяются двухзеркальные антенны (ДЗА), к которым предъявляются требования: формирование диаграмм направленности с линейной или круговой поляризацией излучения, получение высокого коэффициента усиления, работа в требуемых диапазонах частот. При этом применяются как большие параболические зеркала диаметром 2,4 — 7 м [1, 2, 3] — для стационарных и подвижных комплексов, а так же и относительно небольшие зеркала диаметром 1 — 1,2 м — для мобильных комплексов [4].

В системах спутниковой связи ДЗА используются для организации каналов связи в *Ku* диапазоне: 10,7 — 12,7 ГГц на приём и 13,7 — 14,5 ГГц на передачу.

При построении новых телекоммуникационных комплексов с применением двухзеркальных антенн к последним предъявляются все более высокие требования, обеспечивающие повышение конкурентных преимуществ разрабатываемых систем. В связи с этим существует актуальная задача разработки двухзеркальных антенн с применением перспективных облучателей, способных обеспечить работу в широкой полосе частот, переключать поляризацию, обеспечить высокое значение коэффициента использования поверхности главного зеркала и тем самым повысить коэффициент усиления антенны.

Специфика построения ДЗА состоит в том, что ее облучающая система состоит из первичного облучателя (вспомогательная антенна) и малого зеркала (гиперболическое или эллиптическое). При этом главным требованием к облучателю является эффективное освещение поверхности малого зеркала в относительно узком секторе углов, с минимальным перетеканием энергии за края малого зеркала.

Одним из подходов для решения этих задач является использование антенных решеток в составе облучающей системы зеркальных антенн [5, 6, 7].

При их разработке комплексно решаются задачи широкополосного (диапазонного) согласования, формирования требуемых поляризионных характеристик поля излучения, повышения эффективности использования излучающего раскрыва зеркальных антенн, уменьшения габаритов облучателя и т.д.

Одним из перспективных вариантов первичных излучателей являются печатные излучающие структуры. В статье представлены результаты разработки широкополосного печатного излучателя, четырехэлементной антенной решётки, которая использована в качестве первичного облучателя ДЗА.

Исследования проводились на основе электродинамического моделирования с применением системы автоматизированного проектирования *FEKO* [8].

2. Разработка широкополосного первичного облучателя ДЗА с управляемой поляризацией

Разработана модель широкополосного печатного излучателя. Его 3D-модель показана на рис. 1. Особенности конструктивного исполнения разработанной модели печатного излучателя являются дугообразные вырезы в углах печатной структуры излучателя, а также наличие металлической пластины, повторяющей форму печатной структуры и размещённой над ней на некоторой высоте. Эти меры позволяют обеспечить широкополосное согласование на входах печатного излучателя. При этом пассивная металлическая надстройка не оказывает влияния на поляризионную структуру поля излучения печатной антенны. Излучатель имеет две точки питания зондами с портами, подключёнными в основании зондов на слое металлизации подложки.

Данная печатная излучающая структура позволяет сформировать две линейные ортогональные поляризации, а также — круговую поляризацию.

Модель четырёхэлементной антенной решётки печатных излучателей сложной формы с металлической надстройкой показана на рис. 2. На рис. 3

показано расположение точек питающих портов на каждом из излучателей в решётке и их нумерация для случая формирования поля излучения линейной поляризации.

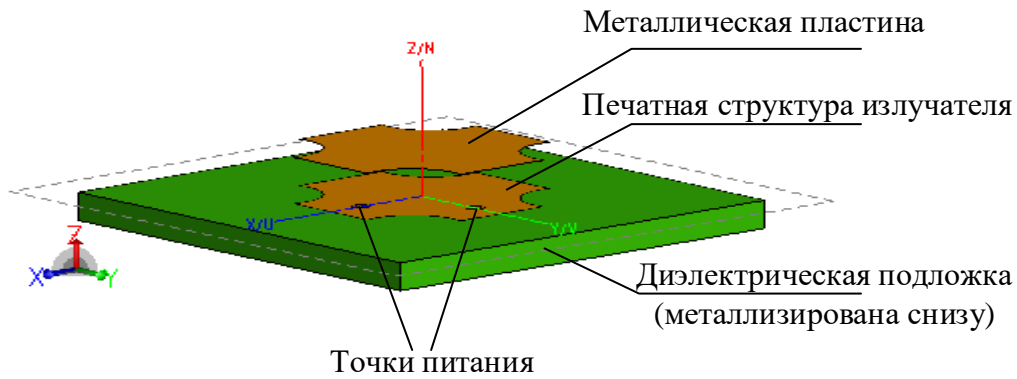
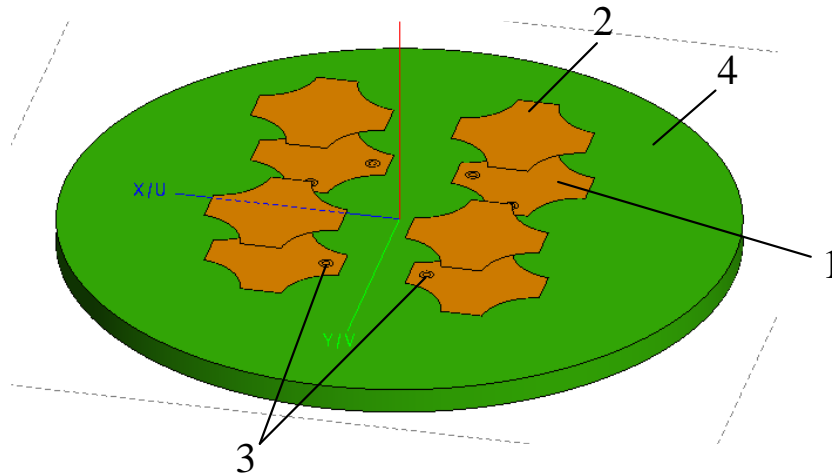


Рис. 1. Модель печатного излучателя с пассивной металлической надстройкой и с двумя точками питания.



1 — печатный излучатель; 2 — пассивная металлическая надстройка;
3 — точки питания излучателей; 4 — диэлектрическая подложка с металлизацией снизу

Рис. 2. Модель решётки печатных излучателей.

Табл. 1. Условия возбуждения портов излучателей при формировании линейных поляризаций поля излучения.

Поляризация	Начальные фазы токов, подводимых к порту, град.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Линейная Л1	0	180	180	0	—	—	—	—
Линейная Л2	—	—	—	—	0	0	180	180

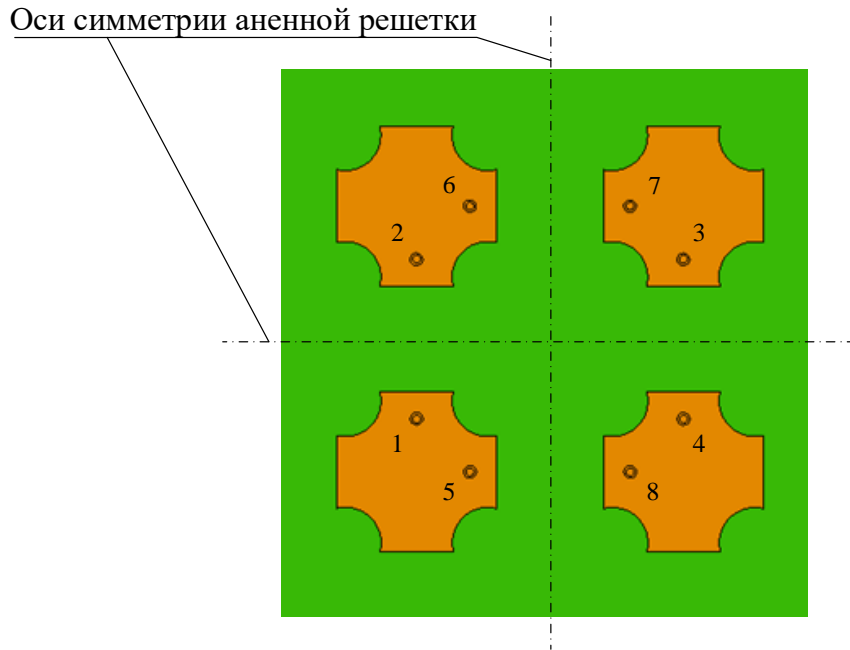


Рис. 3. Размещение и нумерация точек питания в модели решётки печатных излучателей с полем излучения линейной поляризации.

Для формирования поля линейной поляризации возбуждение портов излучателей осуществляется согласно данным табл. 1. Так, при формировании одной из линейных поляризаций Л1 питание подводится к портам в точках 1, 2, 3, 4, а остальные порты нагружаются на согласованную нагрузку. При этом порты 1 и 4 запитываются с фазой тока 0° , а порты 2 и 3 — с фазой тока 180° . Порты четырёхэлементной антенной решётки запитываются группами в противофазе, так как эти порты находятся на группах излучателей попарно расположенных зеркально друг друга относительно оси симметрии антенной решётки. Данный режим возбуждения позволяет обеспечить качественные поляризационные характеристики поля излучения антенной решётки в широком диапазоне частот.

На рис. 4 представлены нормированные объёмные диаграммы направленности (ДН) решётки печатных излучателей при формировании поля линейной поляризации (Л1) в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц.

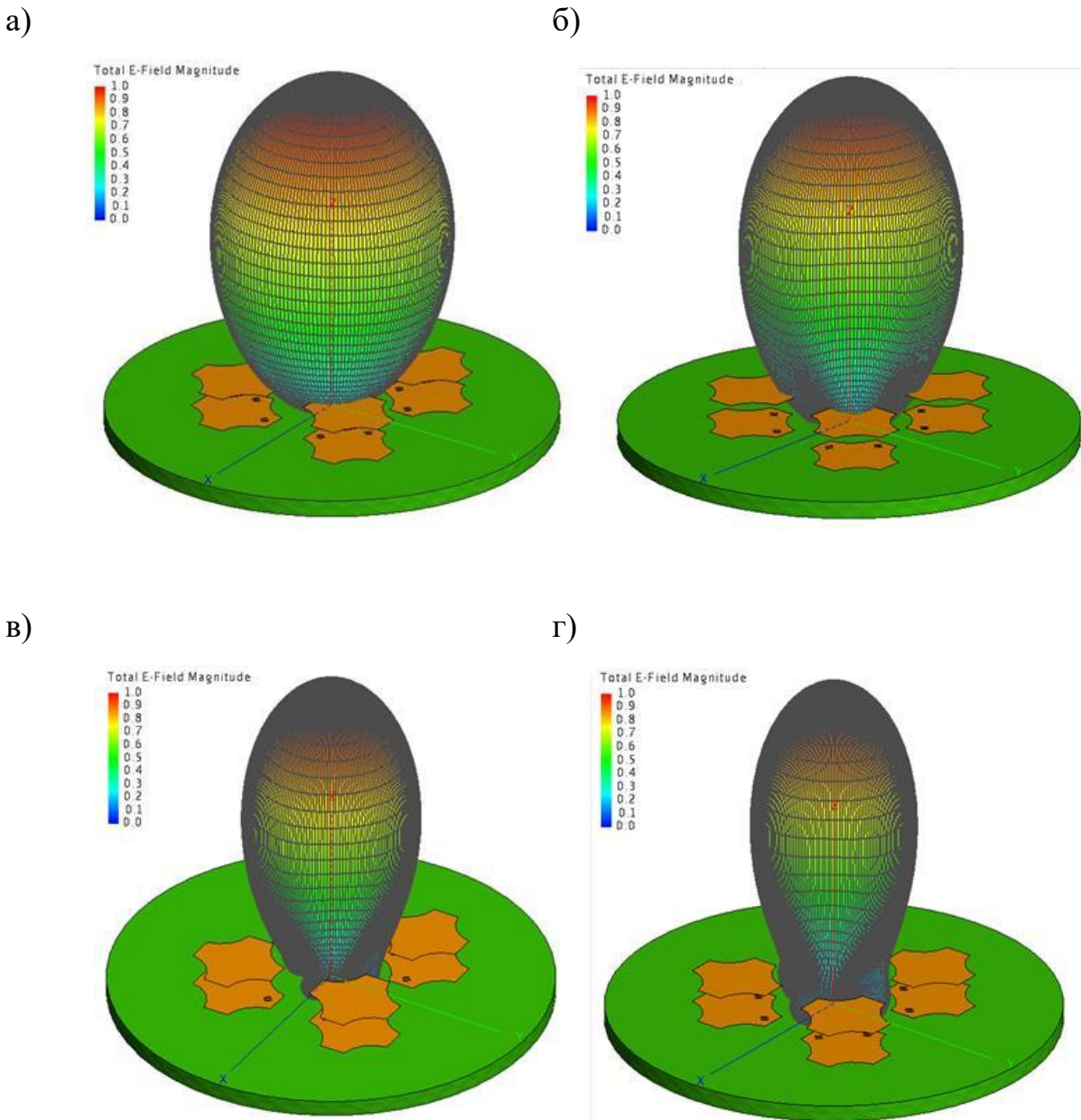


Рис. 4. Объемные ДН антенной решетки при формировании поля излучения линейной поляризации на частотах 10,7 ГГц (а), 12,7 ГГц (б), 13,7 ГГц (в), 14,5 ГГц (г).

Антенная решётка в диапазоне частот 10,7 — 12,7 ГГц характеризуется ДН с шириной главного лепестка $2\Delta\theta = 47^\circ — 50^\circ$ при уровне бокового излучения не превышающем УБИ = -25 дБ в Е- и Н-плоскости. Низкий уровень побочного излучения обусловлен тем, что на рабочих кромках печатных излучающих структур отсутствуют противофазные токи, а шаг решётки не превышает расчётного значения, соответствующего условию отсутствия дифракционных максимумов диаграммы направленности.

В диапазоне частот 13,7 — 14,5 ГГц $2\Delta\theta = 36^\circ — 40^\circ$ при уровне бокового излучения, не превышающем УБИ = -14 дБ. Рост бокового излучения, обусловленный увеличением электрического расстояния между первичными излучателями, является причиной незначительного уменьшения коэффициента усиления на частотах выше 13,7 ГГц. На рис. 5 показаны частотные зависимости коэффициента усиления антенной решётки при формировании поля излучения линейной поляризации.

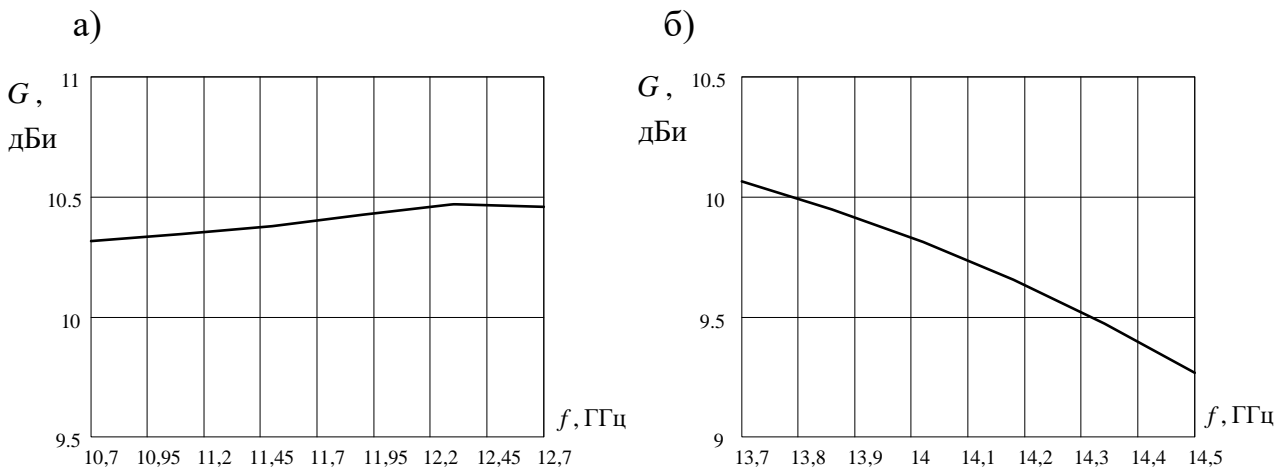


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента усиления антенной решетки при формировании поля излучения линейной поляризации в диапазонах частот: 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б).

Видно, что в двух рабочих полосах частот решетка печатных излучателей при формировании поля линейной поляризации характеризуется незначительными изменениями коэффициента усиления относительно значения 10 дБи (от 9,3 дБи до 10,4 дБи).

На рис. 6 показаны частотные зависимости K_{CTU} на одном из активных портов облучателя при формировании поля излучения линейной поляризации.

Видно, что разработанная антенная решетка обеспечивает выполнение условия широкополосного согласования за счет собственных входных характеристик.

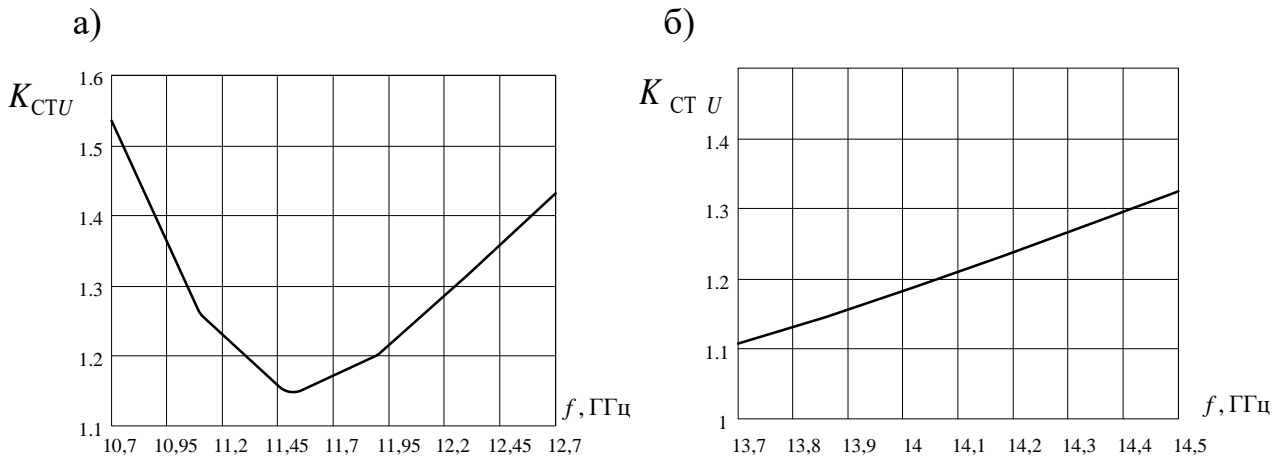


Рис. 6. Частотная зависимость K_{STU} на одном из активных портов облучателя при формировании поля излучения линейной поляризации в диапазонах частот: 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б).

На рис. 7 показаны частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности антенной решетки при формировании поля излучения линейной поляризации.

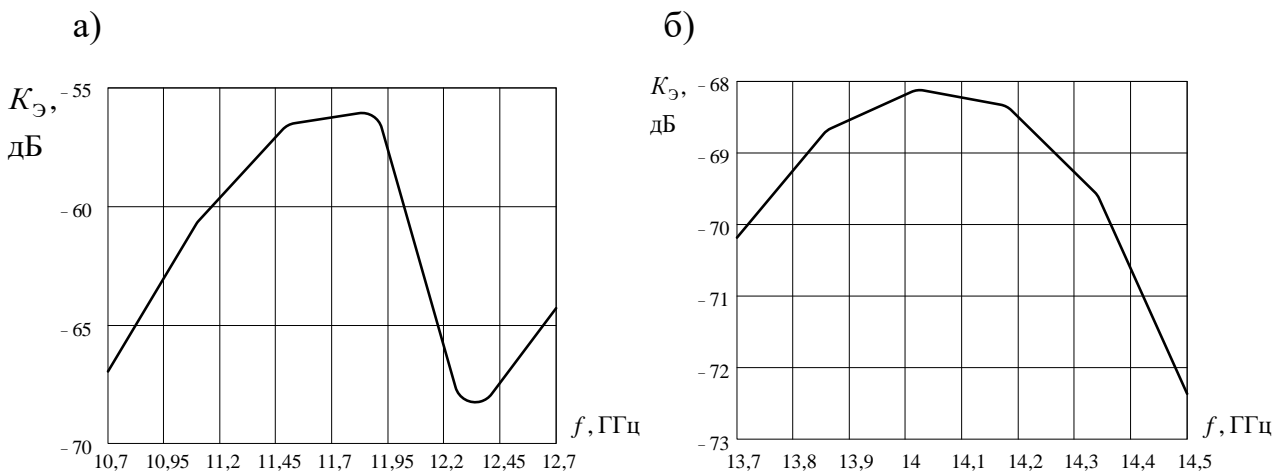


Рис. 7. Частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности антенной решетки при формировании поля излучения линейной поляризации в диапазонах частот: 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б).

На рис. 8 показаны диаграммы направленности антенной решётки для основной и кросс-поляризационной составляющих поля излучения линейной поляризации на частотах 10,7 ГГц (а) и 14,5 ГГц (б). Диаграммы показаны в плоскости, повёрнутой на угол 45° относительно E -плоскости, в которой наблюдается максимальный уровень кросс-поляризационного излучения.

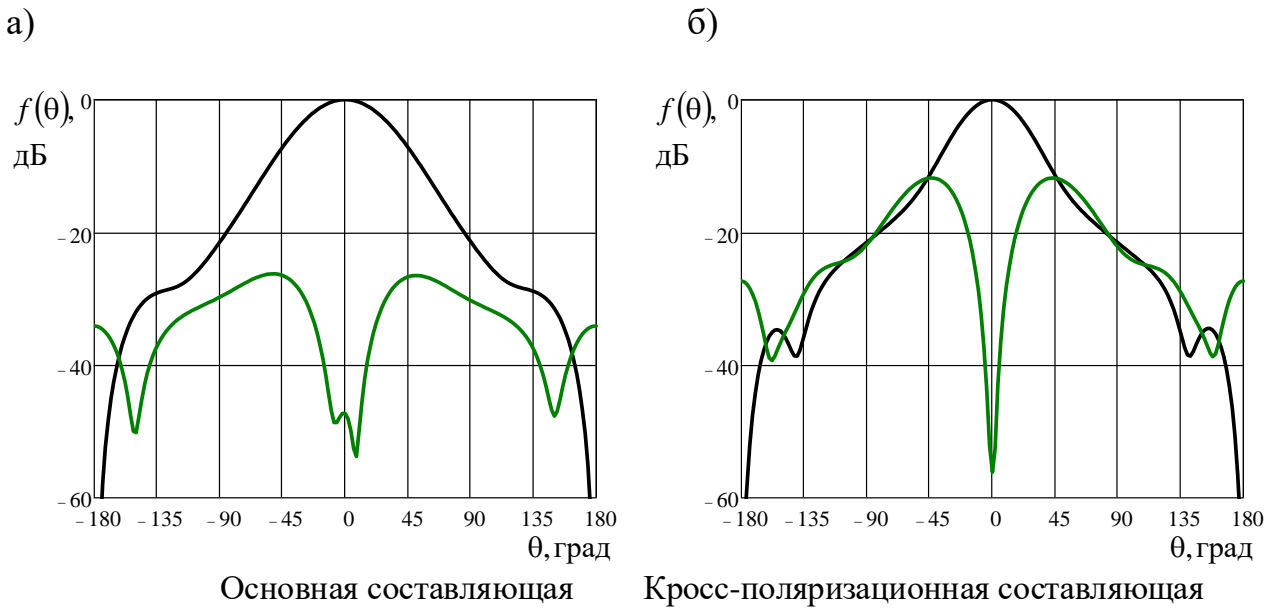


Рис. 8. Диаграммы направленности антенной решётки для основной и кросс-поляризационной составляющих поля излучения линейной поляризации на частотах 10,7 ГГц (а) и 14,5 ГГц (б) в плоскости, повернутой на угол 45° относительно E -плоскости.

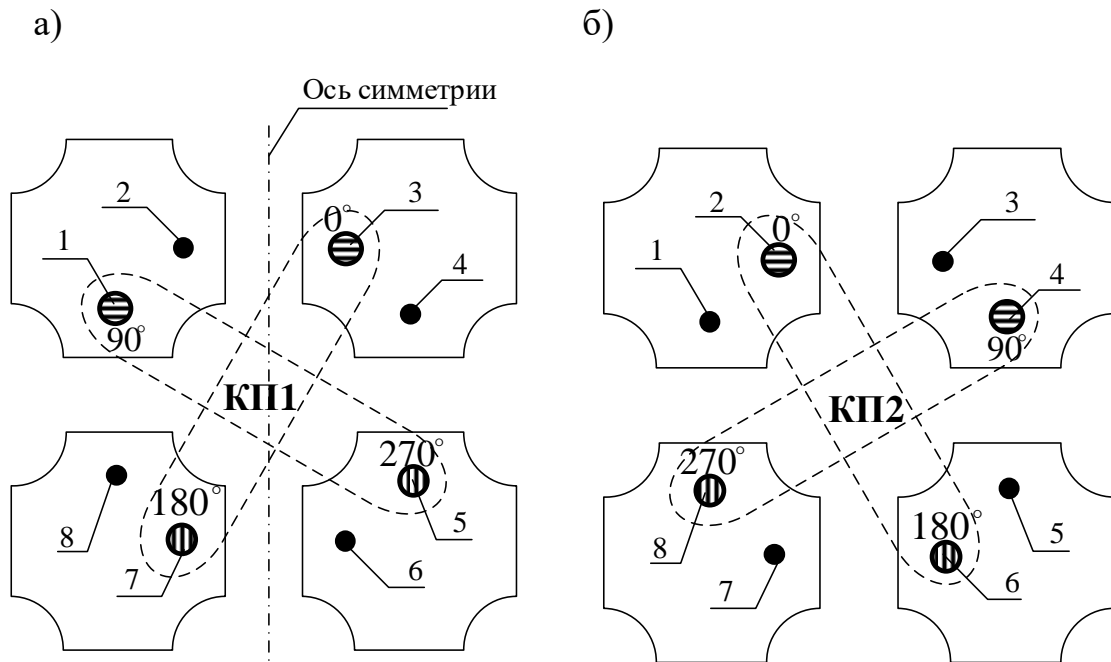


Рис. 9. Схемы возбуждения излучателей в решетке для формирования различных круговых поляризаций поля излучения КП1 (а) и КП2 (б).

Из рис. 7 — 8 видно, что в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц антенная решётка формирует поле с качественной линейной

поляризации, которая характеризуется низким уровнем паразитной кросс-поляризационной составляющей.

При формировании поля излучения круговой поляризации в антенной решетке печатных излучателей требуется задать режимы возбуждения [9], схематично показанные на рис. 9.

Для формирования круговой поляризации используются группы противофазно возбуждаемых входов печатных излучателей с начальными фазами токов, приведенными в табл.2.

Табл. 2. Условия возбуждения портов излучателей при формировании линейных поляризаций поля излучения.

Поляризация	Начальные фазы токов, подводимых к порту, град.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Круговая КП1	90	—	0	—	270	—	180	—
Круговая КП2	—	0	—	90	—	180	—	270

Отличительная особенность рассмотренной модели антенной решетки при формировании поля круговой поляризации состоит в том, что согласно данным табл. 2 и рис. 9 печатные излучатели возбуждаются только по одному входу, при этом каждый из излучателей работает в режиме формирования поля линейной поляризации.

Проведенные исследования показали, что характеристики направленности излучения антенн и её входные характеристики лежат в следующих пределах:

— в диапазоне частот 10,7 — 12,7 ГГц коэффициент усиления решётки лежит в пределах от 9,8 дБи до 10,8 дБи, а коэффициент стоячей волны на активных входах печатных излучателей — от 1,15 до 1,5;

— в диапазоне частот 13,7 — 14,5 ГГц коэффициент усиления решётки лежит в пределах от 9,6 дБи до 10,7 дБи, а коэффициент стоячей волны на активных входах печатных излучателей — от 1,15 до 1,2.

На рис. 10 показаны частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности антенной решетки при формировании поля излучения круговой поляризации.

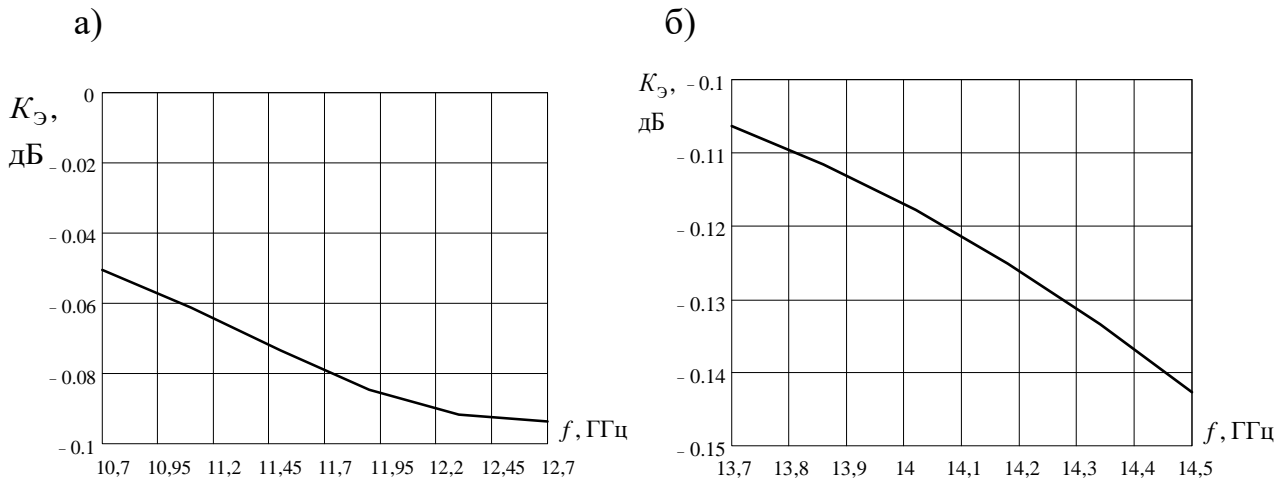


Рис. 10. Частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности антенной решетки при формировании поля излучения круговой поляризации в диапазонах частот: 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б).

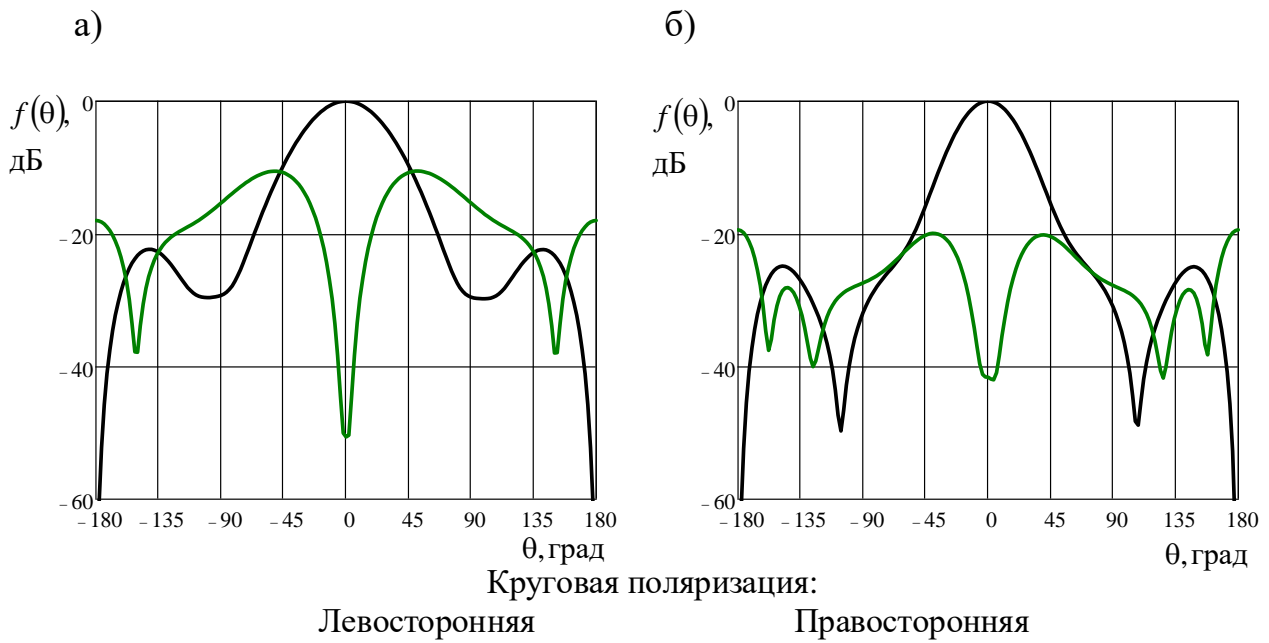


Рис. 11. Диаграммы направленности антенной решётки для основной (левосторонней-круговой) и паразитной (правосторонней-круговой) составляющих поля излучения круговой поляризации на частотах 10,7 ГГц (а) и 14,5 ГГц (б).

На рис. 11 показаны диаграммы направленности антенной решётки для основной (левосторонней-круговой) и паразитной (правосторонней-круговой)

составляющих поля излучения с круговой поляризацией на частотах 10,7 и 14,5 ГГц. Диаграммы рассчитаны в плоскости, повернутой на угол 45° относительно оси симметрии антенной решётки, показанной на рис. 9.

Из рис. 10 — 11 видно, что в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц антенная решётка формирует поле излучения с качественной круговой поляризацией.

Таким образом, разработанная антенная решётка отвечает всем требованиям, предъявляемым к первичному облучателю двухзеркальной антенн.

3. Исследование характеристик двухзеркальной антенны Кассегрена с разработанным первичным облучателем

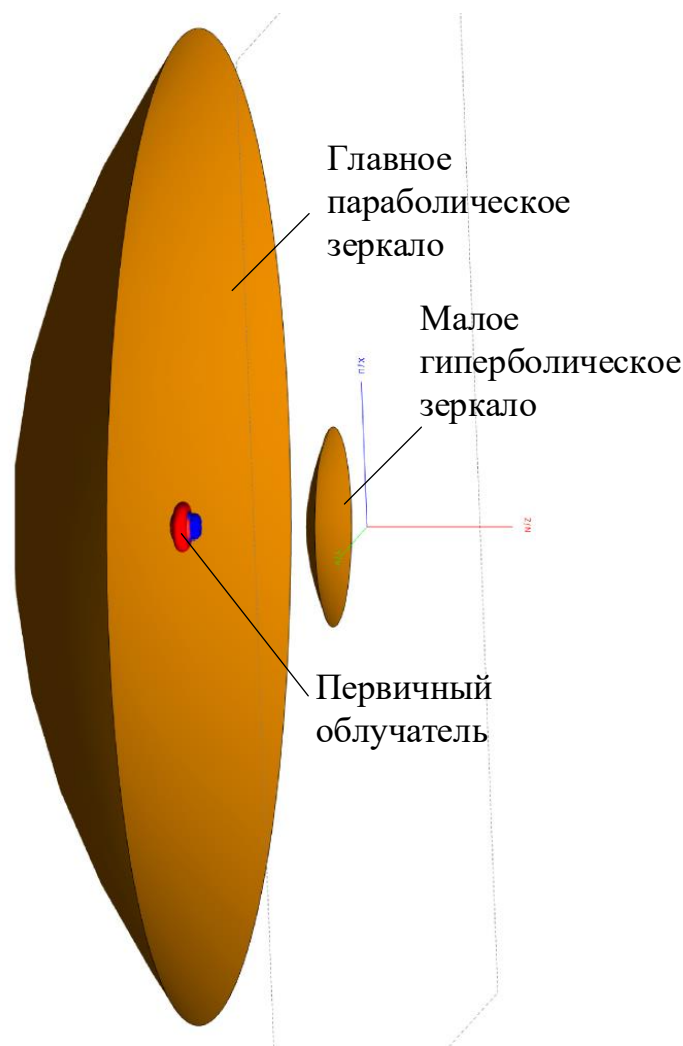
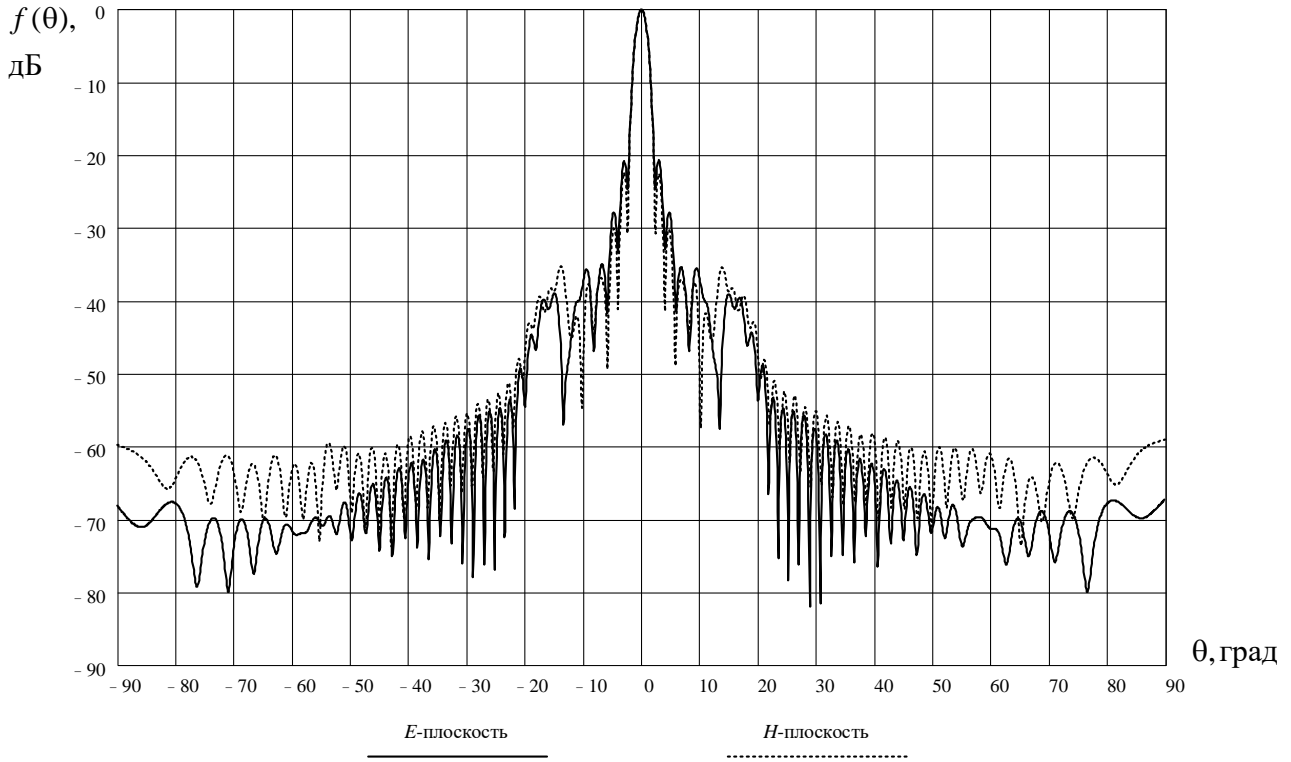


Рис. 12. Разработанная модель ДЗА Кассегрена.

а)



б)

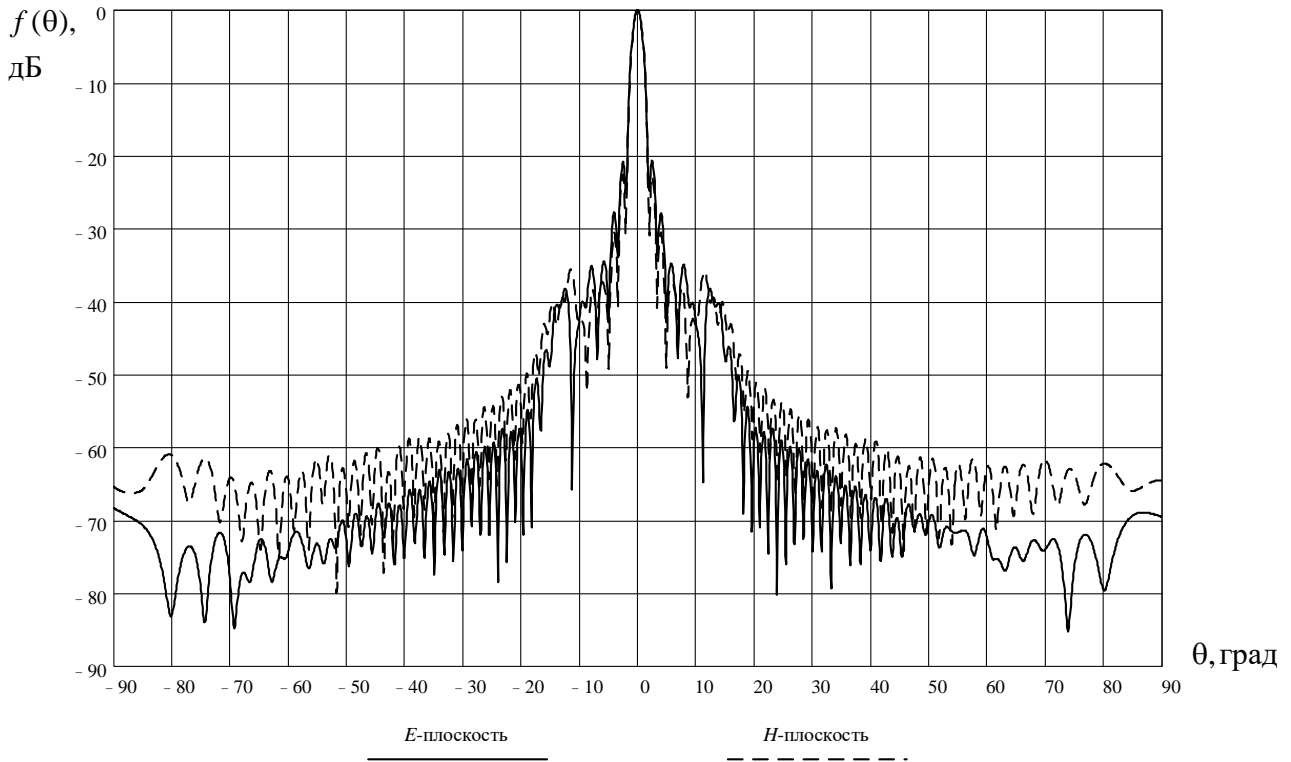
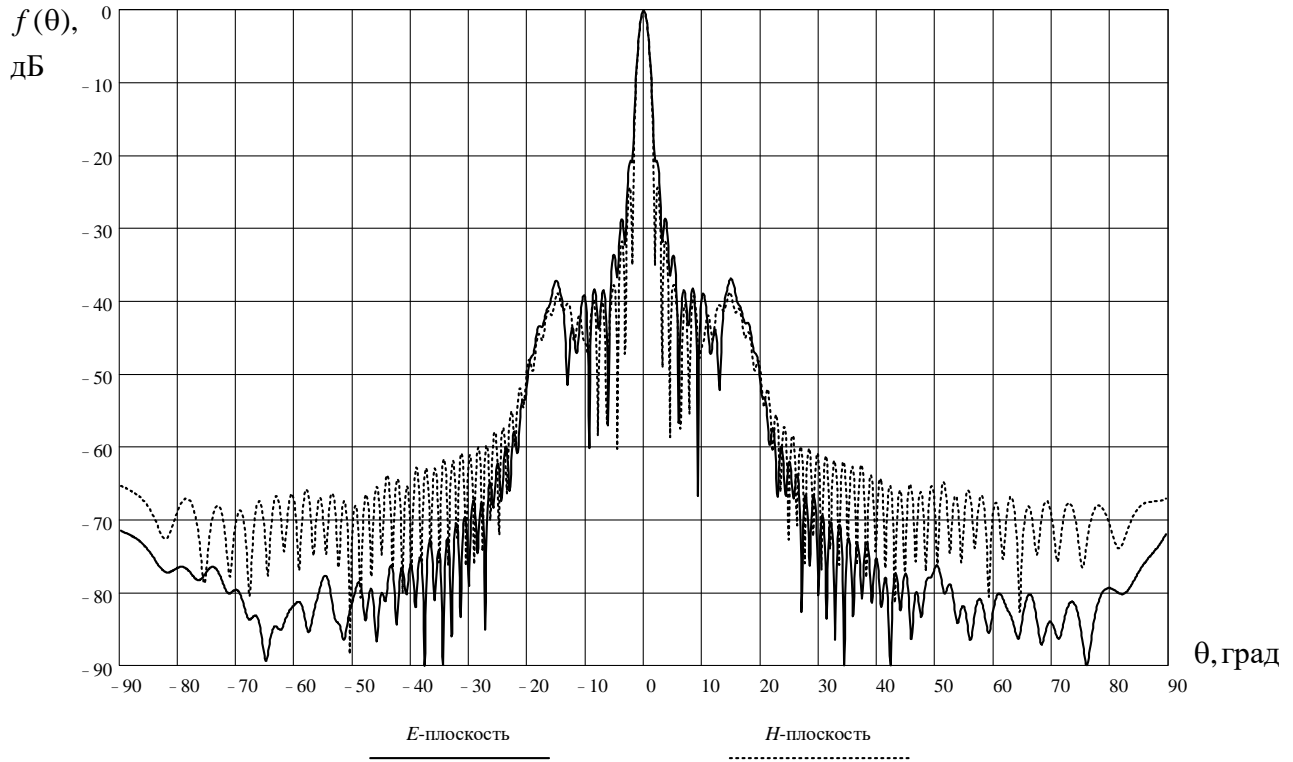


Рис. 13. Диаграммы направленности ДЗА Кассегрена при формировании поля излучения линейной поляризации на частоте 10,7 ГГц (а) и 12,7 ГГц (б)

а)



б)

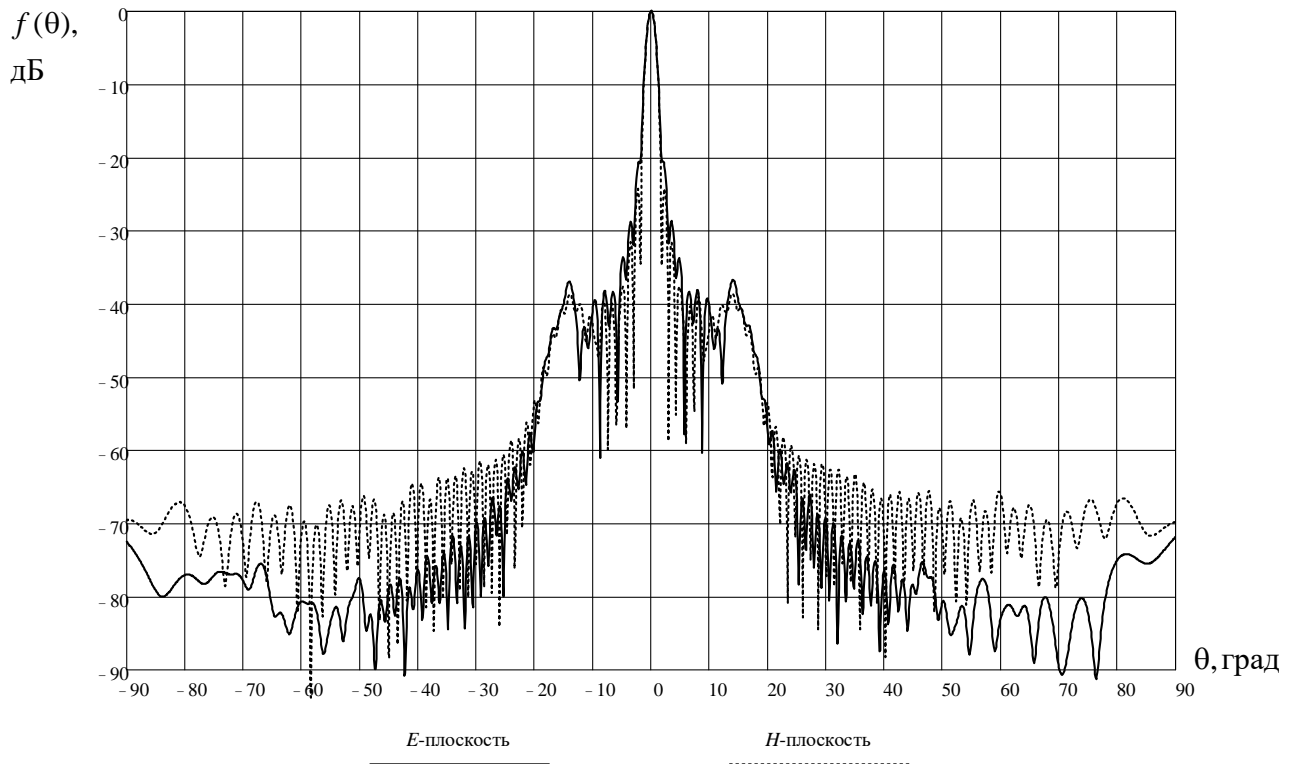


Рис. 14. Диаграммы направленности ДЗА Кассегрена при формировании поля излучения линейной поляризации на частоте 13,7 ГГц (а) и 14,5 ГГц (б)

Приведем рассчитанные параметры большого и малого зеркал ДЗА Кассегрена (рис. 12):

- диаметр большого зеркала: 1 м;
- фокусное расстояние большого зеркала: 0,4 м;
- полный угол раскрыва большого зеркала: 128°;
- диаметр малого зеркала: 0,19 м;
- эксцентриситет гиперболической поверхности малого зеркала: 3,8;
- фокусное расстояние малого зеркала: 0,059 м;
- расстояние между фокусами гиперболы: 0,16 м;
- максимальный угол падения луча на малое зеркало: 36°.

На рис. 13 — 14 показаны ДН ДЗА Кассегрена в диапазоне частот 10,7 — 14,5 ГГц при формировании поля излучения линейной поляризации. Проведенные расчеты показали, что для круговой поляризации излучения ДН ДЗА отличаются незначительно.

При этом в диапазоне частот 10,7 — 12,7 ГГц при формировании поля линейной и круговой поляризации получен коэффициент усиления ДЗА не менее 37,8 дБи. В диапазоне частот 13,7 — 14,5 получены значения коэффициента усиления для поля линейной и круговой поляризации не менее 40,6 дБи. Частотные зависимости коэффициента усиления двухзеркальной антенны при формировании поля излучения линейной и круговой поляризации показаны на рис. 15.

Проанализируем эффективность использования поверхности большого зеркала антенны при использовании разработанного первичного облучателя с линейной или круговой поляризацией излучения. Рассмотрим частотные зависимости коэффициента использования поверхности апертуры главного зеркала (КИП) антенны. Для случая равномерного амплитудного распределения расчёт коэффициента усиления параболической антенны выполняется по формуле [10]

$$G_1 = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \nu,$$

где $v=1$ — апертурный КИП, S — площадь поверхности раскрыва параболического зеркала, незатененная малым зеркалом.

КИП исследуемой двухзеркальной антенны определяется отношением значения коэффициента усиления исследуемой антенны к G_1 . Результаты расчётов представлены на рис. 16.

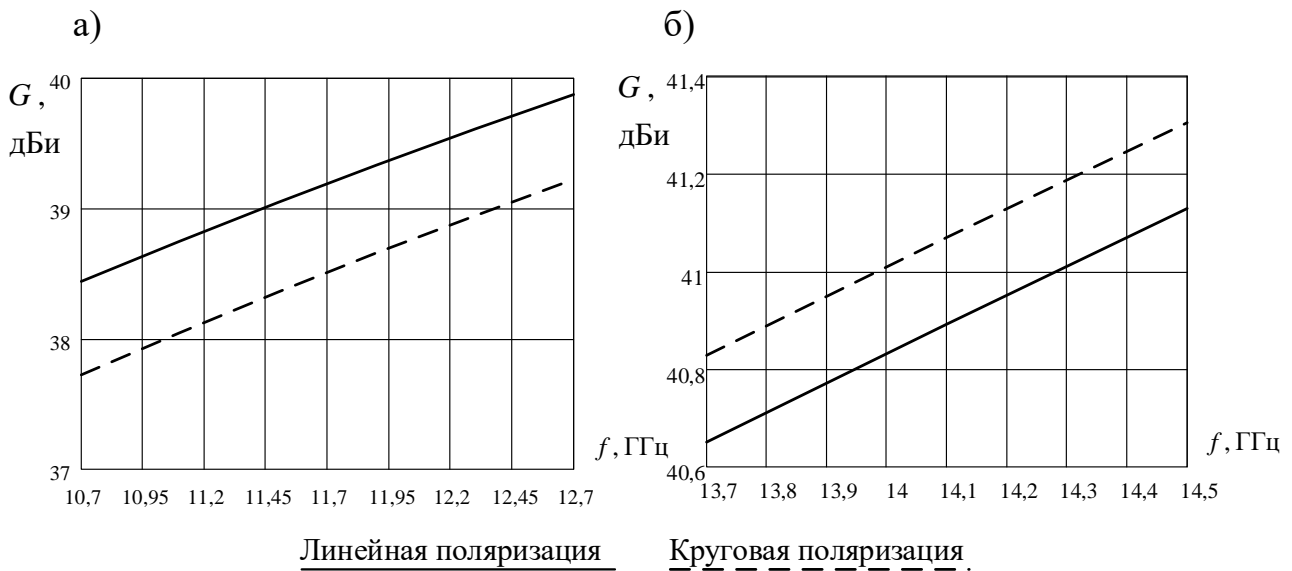


Рис. 15. Частотные зависимости коэффициента усиления двухзеркальной антенны при формировании поля излучения линейной и круговой поляризации в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б)

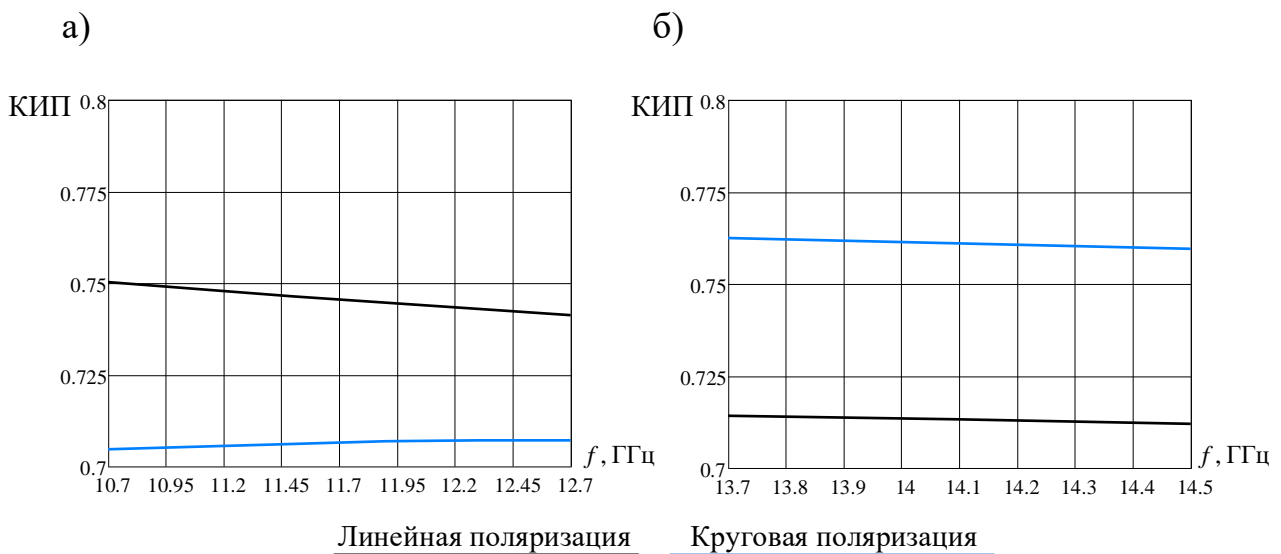


Рис. 16. Частотные зависимости КИП двухзеркальной антенны Кассегрена с линейной и круговой поляризацией поля излучения в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц (а) и 13,7 — 14,5 ГГц (б).

Улучшение КИП ДЗА при формировании поля излучения круговой поляризации в диапазоне частот 13,7 — 14,5 ГГц обусловлено тем, что облучатель антенны обеспечивает более высокую развязку между основной левосторонней-круговой и паразитной правосторонней-круговой составляющими (см. рис. 11), чем в диапазоне частот 10,7 — 12,7 ГГц.

На рис. 17 показаны частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности ДЗА.

При формировании поля линейной и круговой поляризации ширина главного луча ДН составляет около $1,9^\circ$ — $1,5^\circ$. Максимальный уровень бокового излучения, $УБЛ_{max}$, составляет -21 — -22 дБ.

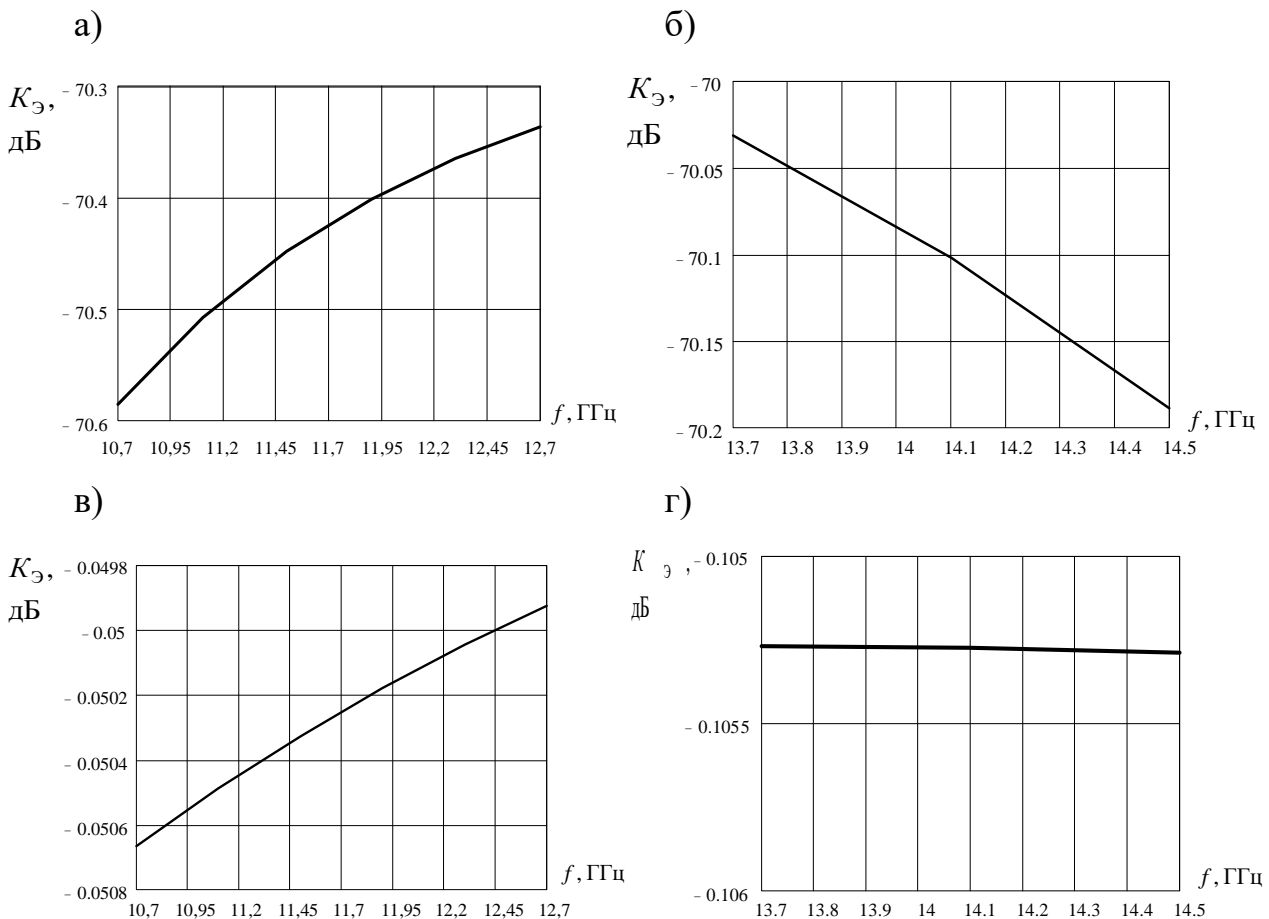


Рис. 17. Частотные зависимости осевого коэффициента эллиптичности ДЗА при формировании поля излучения линейной (а, б) и круговой (в, г) поляризации.

Показано, что разработанная двухзеркальная антенна в указанных диапазонах частот характеризуется высоким коэффициентом усиления и качественными поляризационными характеристиками.

Выводы

Разработана модель широкополосного компактного первичного облучателя ДЗА в виде 4-элементной решетки печатных излучателей. Проведено исследование характеристик излучения и входных характеристик облучателя при формировании поля излучения линейной поляризации и круговой поляризации в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц. Показано, что по своим характеристикам разработанный облучатель полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Разработана модель двухзеркальной антенны Кассегрена с применением разработанного широкополосного первичного облучателя. Исследованы характеристики излучения при формировании поля излучения линейной поляризации и круговой поляризации в диапазонах частот 10,7 — 12,7 ГГц и 13,7 — 14,5 ГГц. Установлено, что разработанная двухзеркальная антенна в указанных диапазонах частот характеризуется высоким коэффициентом усиления 38 — 41 дБи, высоким КИП главного зеркала, качественными поляризационными характеристиками, качественным согласованием на входах излучателей ($K_{CTU} \leq 1,5$). Уровень бокового излучения не более – 21 — –22 дБ. Диаметр главного зеркала равен 1 м.

Литература

1. XI'AN Space Star Technology (Group) CO., LTD. 2.4 m Drive-Away Antenna/Satellite Dish/Sng Vehicles [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.spacestar-antennas.com/drive-away-antenna/2-4m-drive-away-antenna.html> (дата обращения 21.09.2019).
2. XI'AN Space Star Technology (Group) CO., LTD. 6.2 m ultra-portable rib antenna operating process [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

<http://www.spacestar-antennas.com/info/6-2m-ultra-portable-rib-antenn-1118752.html> (дата обращения 21.09.2019).

3. ОАО НПО ПМ «Развитие». Наземные антенные системы — основной элемент современных систем спутниковой связи [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docplayer.ru/42033685-Nazemnye-antennnye-sistemy-osnovnoy-element-sovremennyh-sistem-sputnikovoy-svyazi.html> (дата обращения 21.09.2019).

4. Технологии и средства связи. Носимый комплекс спутниковой связи СНАРК-100Р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://lib.tssonline.ru/articles2/sputnik/nosimyy-kompleks-sputnikovoy-svyazi-snark-100r> (дата обращения 21.09.2018).

5. Ivashina M. V. Optimal number of elements and element spacing of wide-band focal plane arrays for a new generation radio telescope. *Proc. of the EuCAP'2007*, Edinburg, 11 — 16 November 2007 EuCAP. — 2007. — P. 1 — 7.

6. van Cappellen W. Phased array feeds for the westerbork synthesis radio telescope / W. van Cappellen, W. APERTI. *Proceedings of the Phased Array Systems and Technology Symposium*, 12 — 15 October 2010. IEEE. — 2010. — P. 640 — 647.

7. Olsson, R. The Eleven antenna: a compact low-profile decade bandwidth dual polarized feed for reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. — Feb. 2006. — Vol. 54, No. 2, pt. 1, P. 368 — 375.

8. Банков, С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. — М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008. — 246 с.

9. Huang J. “A Technique for an array to generate circular polarization with linearly polarized elements” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, 1986, pp. 1113—1124.

10. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / В.С. Филиппов, Л.И. Пономарев, А.Ю. Гринев и др.; Под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радио и связь, 1994. — С. 87.

Для цитирования:

Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Двухзеркальная антенна с облучателем в виде широкополосной антенной решетки с управляемой поляризацией поля излучения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/14/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.14